

# Выпрямитель для усилителя или сага о быстром диоде

Многие говорят что в выпрямителях усилителей должны использоваться только лишь **диоды Шоттки**, или **сверхбыстрые диоды** ("суперфаст" - это если по-русски 😊). Если поставить обычные "медленные" диоды, то Великий Аудиофильский Дух обидится и хорошего звука вам не видать! 😞 На наше счастье, Великий Аудиофильский Дух может навредить только тем, кто в него верит. Давайте попробуем разобраться в необходимости применения таких диодов без привлечения эзотерики, а при помощи одной лишь науки и техники.

Единственная претензия, предъявляемая к диодам, состоит в том, что они медленно закрываются, и через них протекает обратный ток, разряжающий конденсаторы фильтра. Говорят, что это происходит примерно так, как показано на рис.1 красной линией.

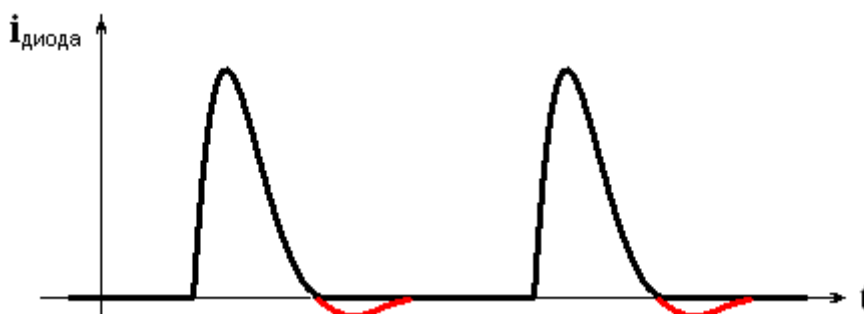


Рис. 1. Красная линия - ток разряда диода, если он (диод) медленно закрывается.

Называют две основных причины протекания обратного тока:

1. Рассасывание объемного заряда в базе диода, в течение которого диод еще не закрылся.
2. Заряд емкости обратно смещенного p-n перехода, когда диод уже закрылся.

Мы разберем обе причины. Но сначала давайте подумаем вот о чем: если бы через диод протекал бы большой обратный ток (даже такой, как на рисунке 1), то конденсаторы фильтра разряжались бы сразу после своей зарядки, и напряжения питания никакого бы и не было! Раз выпрямители работают даже на медленных диодах, то разряд этот не такой уж большой и страшный.

Начнем с эксперимента - практика, как известно, - критерий истины. Соберем схему простейшего выпрямителя с обычным "медленным" диодом (рис.2):

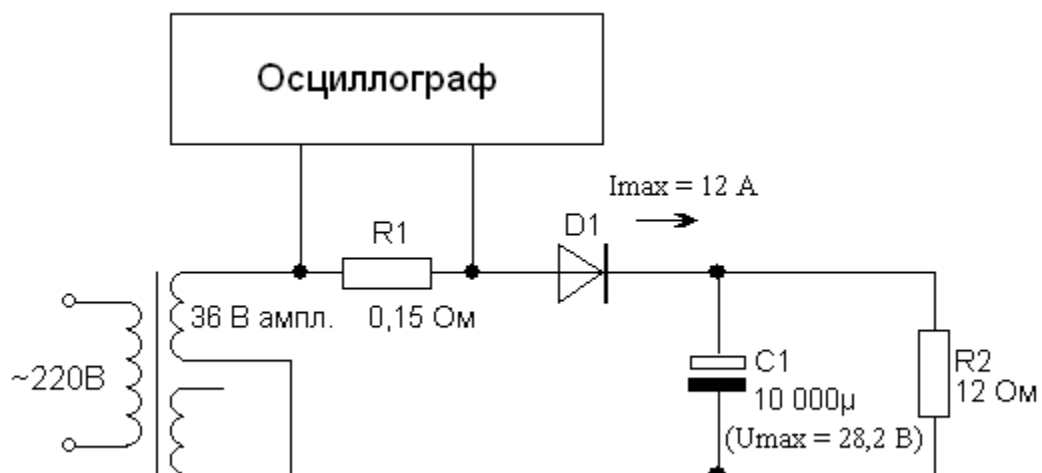


Рис. 2. Схема выпрямителя.

Вот как это выглядит в реальности:

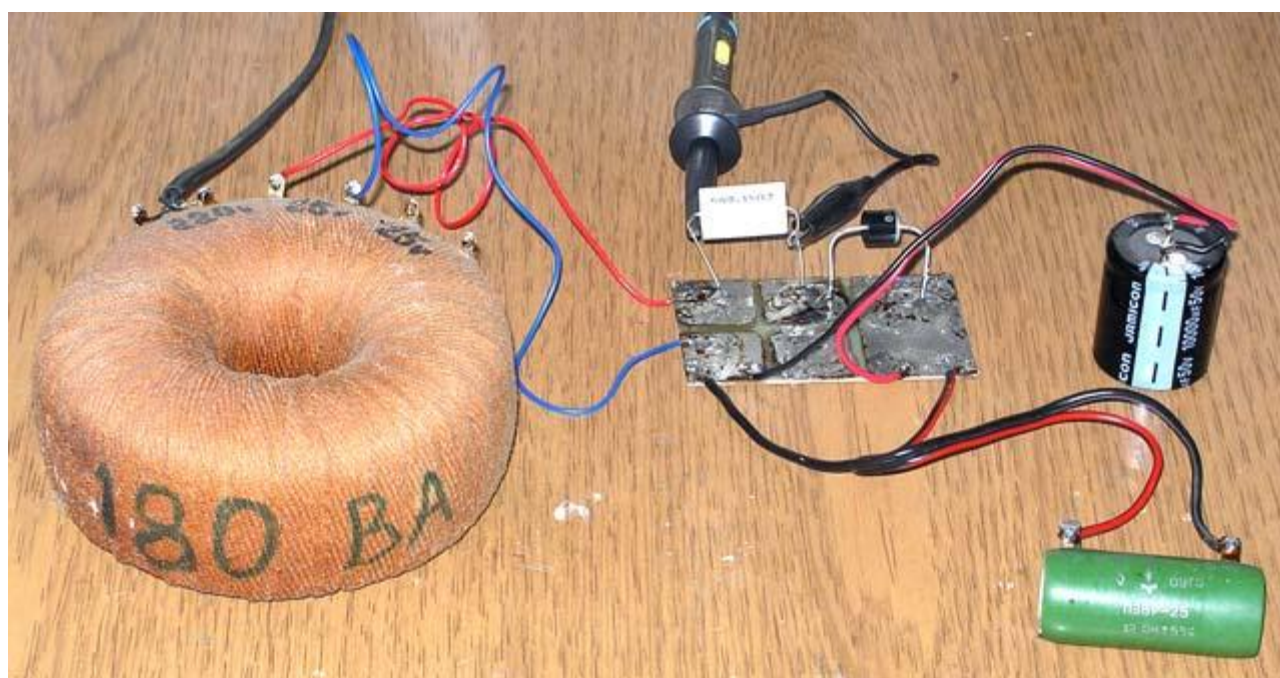


Рис. 3. Фото выпрямителя.

Посмотрим на осциллографе ток через диод, ток довольно большой - максимальная амплитуда 12 ампер, что соответствует работе диода в реальных условиях:

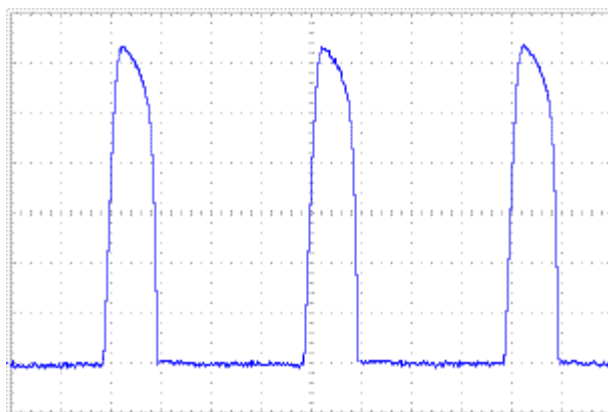


Рис.4. Ток через диод.

Чего-то не видно этих самых токов разряда. Для большей наглядности изменим масштаб и добавим на осциллограмму линию развертки, чтобы был виден ноль, и если бы график нырял вниз вследствие тока разряда, это было бы хорошо заметно (рис.5):



Рис.5. Тот же самый ток через тот же самый диод.

Сравните рис.1 и рис.5. В реальности не хватает той части, которая соответствует разряду конденсатора обратным током диода. Значит ли это, что такого тока нет? Нет, обратный ток есть, просто он настолько мизерный, что обнаружить его обычным осциллографом в таком простом эксперименте невозможно (я даже так с ходу и не скажу, как можно измерить ток разряда в моем выпрямителе).

Давайте попробуем прикинуть, какой разрядный ток будет протекать через диод и насколько этот ток разрядит конденсатор фильтра. Я использую упрощенный расчет, так как при полном правильном расчете не обойтись без интегралов и прочей высшей математики. Упрощение сильно снизит точность (и зависит результаты!), но порядок цифр будет более-менее верным, и мы его наглядно представим.

Для простоты давайте рассчитаем мой выпрямитель, который я исследовал.

### Причина 1.

Рассасывание объемного заряда в базе диода, вследствие чего он остается некоторое время в открытом состоянии. Время рассасывания возьмем 10 микросекунд. Это достаточно большое время и у большинства диодов оно заметно меньше. Принцип расчета показан на рис. 6.

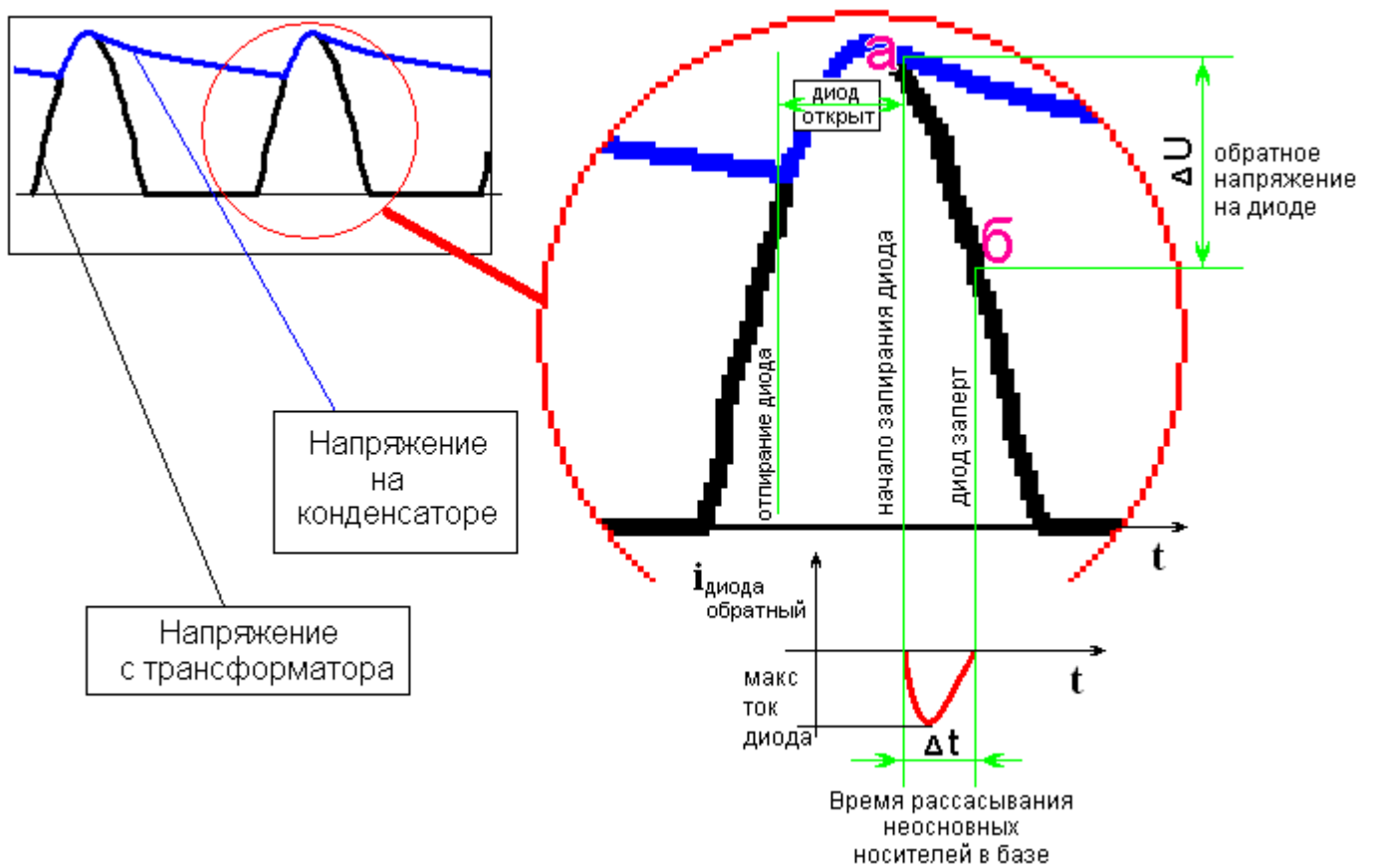


Рис.6. Обратный ток диода и обратное напряжение, вызывающее этот ток.

Итак, какое-то время диод открыт в прямом направлении и проводит прямой ток. После чего он должен закрыться, чтобы не пропустить ток обратный. Но диод не закрывается, и начинает пропускать обратный ток, показанный на рис.6 красной линией. Ток протекает в течение времени  $\Delta t$ , равному времени рассасывания, т.е. у нас  $\Delta t = 10$  мкс. При этом к диоду приложено обратное напряжение  $\Delta U$ , из-за которого на самом деле и протекает обратный ток (а из-за чего еще ему протекать).

Если мы узнаем  $\Delta U$ , то можно будет определить и ток, а зная ток и время, которое он протекает – определить разряд конденсатора фильтра.

Поехали. Посмотрим, что там делается на самом деле – реальная осциллограмма на рис.7:

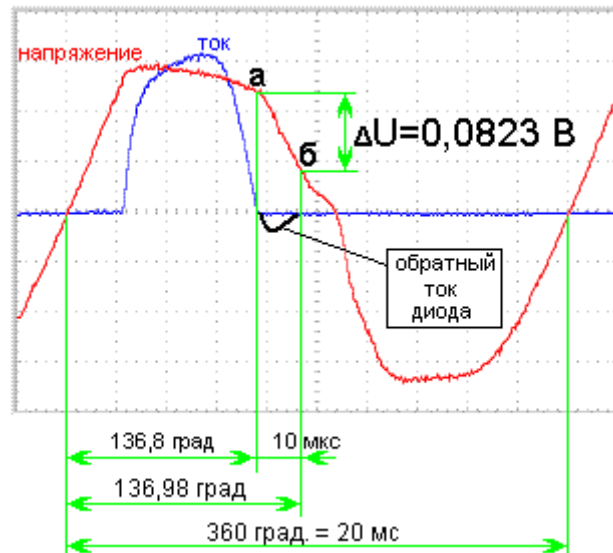


Рис. 7. Осциллограмма напряжения и тока диода с необходимыми построениями.

Для нахождения  $\Delta U$  определимся со временем и фазовыми углами. Находим цену деления по горизонтали: 360 градусов = 50 делений, значит одно деление 7,2 градуса. От начала периода напряжения до конца протекания тока диода:

$$19 \text{ делений} = 19 \cdot 7,2 = 136,8^\circ.$$

Это начало обратного тока диода. Обратный ток длится  $\Delta t = 10$  мксек. Переведем секунды в градусы: один период синусоиды 360 градусов = 20 миллисек, а 10 мкс - X. Из пропорции находим, что  $X = 10 \text{ мкс} = 0,18$  градуса. Следовательно, конец протекания обратного ток диода – 136,98 градуса.

Итак,  $\Delta U$  – это разность напряжений между точками «а» и «б» на рисунках 6 и 7. Напряжение в точке «а»:

$$U_a = 36 \cdot \sin 136,8^\circ = 0,384547 \text{ В}.$$

Напряжение в точке «б»:

$$U_b = 36 \cdot \sin 136,98^\circ = 0,682254 \text{ В} \quad \Delta U = U_a - U_b = 0,08256$$

Теперь найдем ток через диод. Объемное сопротивление базы  $R_b$  мощных диодов примерно равно 0,05 Ом. Ток по закону Ома:

$$I_{\text{обр. макс}} = \frac{\Delta U}{R_b} = \frac{0,08256}{0,05} = 1,6 \text{ А}$$

Ну а теперь посмотрим, насколько же разряжается конденсатор фильтра при разряде током 1,6 А в течение 10 мкс:

$$U_c = \frac{I \cdot \Delta t}{C} = \frac{1,6 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{10\,000 \cdot 10^{-6}} = 1,6 \text{ мВ}$$

На самом деле конденсатор разрядится раза в три меньше (из-за того, что ток не все время остается максимальным). Но и то, сравните напряжение на заряженном конденсаторе = 28,2 вольта и эти несчастные 1,6 мВ! Конечно их будет незаметно, ведь это 0,006% от напряжения на конденсаторе.

Итак, можем ли мы пренебречь разрядом конденсатора на 0,006%? Я так думаю, что можем. Если же поставить быстрый диод с временем рассасывания 100 нс, то разряд конденсатора уменьшится раз в 100 и будет равен 0,00006%. Выигрыш – ну просто обалденный!!!

*В чем заключается упрощение расчета? В том, что на самом деле обратное напряжение на диоде растет медленно, и обратный ток тоже растет медленно и имеет примерно такую форму, как на рис. 6 (т.е. было неправильно делить **максимальное** напряжение на сопротивление). Поэтому средний ток на самом деле будет раз в пять меньше, чем мы посчитали. И максимальным он будет не все время, а лишь чуть-чуть. А вот разряд конденсатора - будет примерно таким же, как и у нас, на самом деле всего лишь раза в два-три меньше.*

## Причина 2.

Обратный ток через емкость запертого диода.

Прежде чем рассуждать о емкостном токе, вспомним, что существует вот такая схема включения диодов моста (рис.8), и она имеет ряд преимуществ перед обыкновенной.

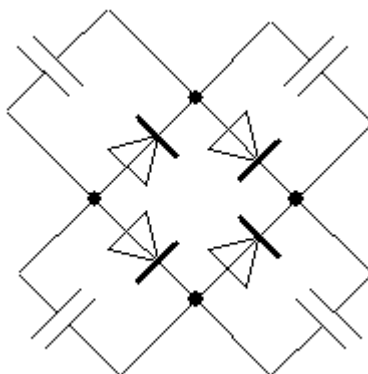


Рис.8. Диодный мост, шунтированный конденсаторами.

*В этой схеме емкость конденсаторов раз в 30 превышает емкость диодов, значит и обратный ток через конденсаторы течет в 30 раз больше (т.е. обратный ток через емкость диода повышается в 30 раз), но никто почему-то не плачет по этому поводу.*

Но у нас просто одиночный диод, его емкость порядка 300 пикофарад. Для того чтобы определить, насколько заряд этой емкости «посадит» конденсатор фильтра, воспользуемся формулой:

$$C_1 \cdot U_2 = C_2 \cdot U_1$$

Тогда, учитывая, что максимальное напряжение конденсатора 28,2 В:

$$U_1 = \frac{C_1 \cdot U_2}{C_2} = \frac{300 \cdot 10^{-12} \cdot 28,2}{10\,000 \cdot 10^{-6}} \approx 1 \text{ мкВ}$$

Это в 1000 раз меньше, чем из-за объемного заряда и на такой мизер внимания обращать вообще нельзя! Точно также, при подключении конденсаторов параллельно диодам, снижение напряжение на конденсаторе фильтра будет 30...50 – мкВ подключайте конденсаторы на здоровье!

Вот и все. Никаких других объективных причин влияния "медленности" диода на работу выпрямителя не существует (разве что ВЧ помехи про которые ниже). Что там думает себе Великий Аудиофильский Дух - нам по барабану, давайте обсудим результаты.

### **Итак.**

Итак, что же получается? Обыкновенные «медленные» диоды никакого заметного разряда конденсаторов фильтра и не вызывают! А как же тогда быть с утверждениями: «я заменил диоды на ультрафаст, и усилитель зазвучал!»? Ну, на это есть первый закон самовнушения: «Если в системе заменить даже самый маленький проводок, система сразу зазвучит лучше». Этот закон на самом деле объясняет 80% всех наших улучшений звучания (хорошо слышимых на слух). На самом деле, никакого ужасного разряда конденсаторов «медленными» диодами не происходит, и значит не происходит никакого изменения звука от применения ультрафаст диодов. Это все аудиофильские сказки.

*А как же быть с тем, что в импульсных блоках питания, например компьютерных, устанавливаю ультрафасты или Шоттки? Все верно. На тех частотах, на которых работают импульсные блоки, время закрывания диода будет равно уже порядка 1/3 периода (а не 1/2000, как на частоте 50 Гц), и это слишком долго. Кроме того, импульсные сигналы имеют крутые фронты, и там напряжение на диоде изменяется резко, поэтому высокое обратное напряжение появляется сразу, что вызывает высокие обратные токи.*

Более того, отпирание/запирание диодов даст импульсы тока с довольно резкими фронтами, а значит и создает спектр помех, который излучается выпрямителем, проводами, идущими к нему от трансформатора и проводами, идущими к конденсатору фильтра. И эти помехи попадают в усилитель и подгружают его высокими частотами (до сотен килогерц). Поэтому некоторые (например, профессор Никитин) даже советуют подключать выпрямитель к трансформатору через дроссель, это замедлит процессы отпирания/запирания диодов и снизит помехи (ну и зачем быстрые диоды, если нужно процессы замедлять?).

Мне нечем измерить высокочастотную помеху, вот низкочастотная часть спектра тока диода моего выпрямителя - до 20 кГц.

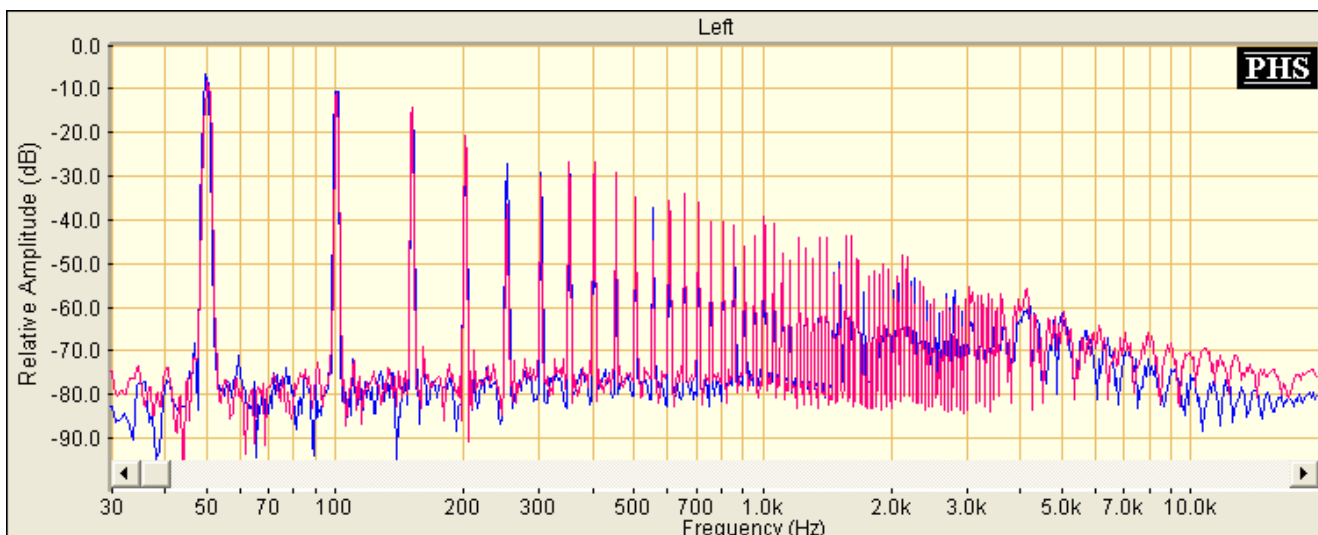


Рис. 9. Спектр тока диода.

Красная линия - спектр тока непосредственно выпрямителя, а синяя - при включении последовательно с диодом катушки с небольшой индуктивностью, что снижает уровень ВЧ составляющих тока, а как раз именно они хорошо излучаются в эфир в виде помех.

Более быстрое отпирание/запирание "быстрых" диодов даст импульсы тока с более резкими фронтами, а значит и спектр помех, излучаемых выпрямителем, станет более широким. И с этими помехами будет труднее бороться, а попав в усилитель, они сильнее перегрузят его высокими частотами, чем если бы использовать «обыкновенные» диоды. Эта перегрузка на ВЧ (теперь уже до мегагерц) дает интермодуляции с усиливаемым сигналом и вполне может быть заметна на слух как изменение звучания. Например примерно таким способом (подмешиванием ультразвуковых сигналов) пользовались некоторые изготовители карманных CD плееров. При этом субъективно увеличивалось количество высоких частот и такую "фичу" даже называли что-то типа "живые высокие". Натуральность звука при этом уменьшалась.

## Но.

Но на самом деле, есть своя польза от применения в выпрямителях диодов Шоттки. Дело в том, что прямое падение напряжения на них гораздо меньше, чем на обычных диодах с p-n переходом, а значит, потери напряжения в выпрямителе будут меньше и больше напряжения уйдет в питание усилителя. В моем тестовом выпрямителе на обычном диоде при токе 12 А падало 1,1 вольт, а на диоде Шоттки - 0,6 вольт. Значит на диодном мосте в первом случае теряется 2,2 В, а во втором только 1,2 В. Скажете: "Подумаешь мелочь, ерунда 1 вольт!". Не всегда мелочь и ерунда. Если у вас напряжение питания усилителя +-60 вольт, то этот самый 1 вольт действительно ерунда. А если питание +-24 вольта? Давайте посчитаем. Просадка напряжения выпрямителя под нагрузкой порядка 80% от хх. В вольтах это получается 19,2. Падение напряжения на диодах 2,4 вольта. Падение напряжения на выходе каскаде усилителя, допустим, 4 вольта. Значит, на выходе усилителя получаем  $19,2 - 2,4 - 4 = 12,8$  вольт амплитуды. На синусе, на нагрузке 6 Ом это будет всего лишь 13,6 Вт. Если же использовать диоды Шоттки, то максимальное напряжение на выходе:  $19,2 - 1,2 - 4 = 14$  В, и синусная мощность уже 16,3 Вт. Чуть-чуть, но больше. Посмотрим на это чуть-чуть повнимательнее.

Музыкальный сигнал имеет импульсную структуру с резкими всплесками:

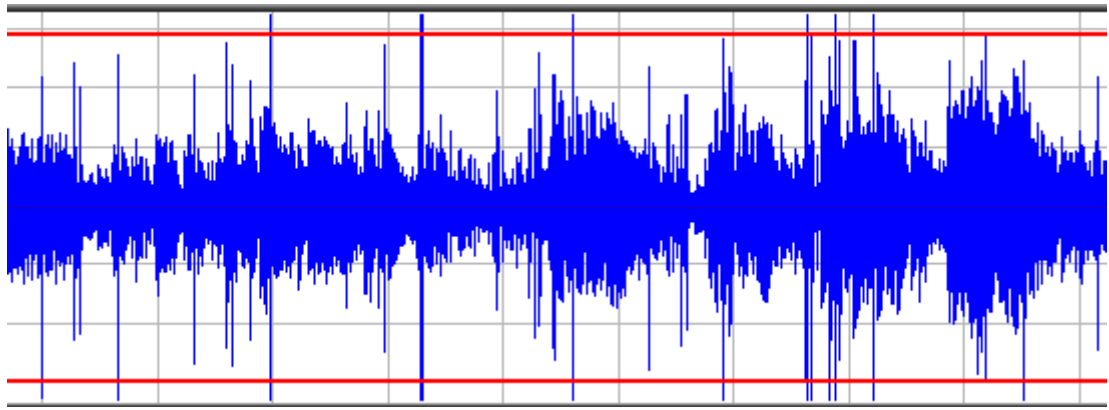


Рис. 10. Осциллограмма музыкального сигнала.

Большей частью средний уровень сигнала невысокий и легко воспроизводится усилителем. А вот максимальные значения импульсов... В нашем примере если максимальная выходная мощность усилителя 16 Вт (с диодами Шоттки), то он полностью воспроизводит пики сигнала (рис.10). А с обычными диодами, когда выходная мощность 13 Вт, пики обрезаются, как показано на рис. 10 красной линией (ну не хватает мощности для них!). Психоакустика установила, что если эти редкие всплески вот так обрезать, то сознание этого не заметит, то есть мы не будем слышать явных искажений. Но с субъективной стороны при прослушивании мы будем ощущать, что "что-то не то" - отсутствует легкость, воздушность, естественность, прозрачность и прочие "чувственные" части звука. И в таком случае действительно замена обычных диодов на диоды Шоттки существенно улучшает звучание! И именно с той "необъяснимой" субъективной стороны!!! На самом же деле - никакой мистики, никакого волшебства, чистая физика! Такой вариант событий встречается, на самом деле, довольно часто, и довольно часто применение диодов Шоттки оправдано и технически, и с точки зрения улучшения звучания усилителей.

*Выходит, что суперфаст диоды* на самом деле в выпрямителе для усилителя и нафиг не нужны и никакой реальной пользы от них нет (зато они более "нежные" и хуже выдерживают перегрузки по току в отличие от "медленных"). А вот **диоды Шоттки** иногда бывают очень даже полезны, но не быстродействием своим, а низким прямым падением напряжения. Естественно, это справедливо только для "аналоговых" выпрямителей, работающих с частотой сети 50 Гц. Но с другой стороны, если говорить о высококачественных усилителях, то только такие источники питания туда и нужны - импульсные источники и Hi-Fi несовместимы! 😊

22.09.2009